

Teledetección LiDAR y multiespectral para el análisis del verde urbano en una ciudad media mediterránea: Palma (Mallorca). Relación con el clima a escala local

LiDAR and multispectral remote sensing for the analysis of urban green in a medium-sized Mediterranean city: Palma (Majorca). Relationship with climate at local escale

Gabriel Alomar-Garau ¹

¹(Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears) gabriel.alomar@uib.es

Joan Bauzà Llinàs ²

²(Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears) joan.bauza@uib.eu

Palabras clave: Verde urbano, LiDAR, análisis multiespectral, análisis espacial, clima urbano

Resumen

En un contexto de impacto del cambio global en la escala local, el verde urbano se revela hoy como una pieza clave en la planificación y regeneración climática y energética de los territorios urbanos contemporáneos a esa escala. La ciudad mediterránea de Palma (Mallorca), en su apuesta por la adaptación al cambio climático, necesita dotarse de estudios que den cuenta de la extensión y los patrones de distribución espacial del verde, así como de sus características morfométricas. En esta comunicación se presenta un estudio introductorio del verde urbano de Palma, basado en un análisis de la combinación de datos de teledetección LiDAR y multiespectral. Los primeros permiten identificar la estructura arbórea, mientras que el análisis espectral permite detectar el contenido de clorofila en las plantas, y, por tanto, además de complementar los datos LiDAR, permite representar cartográficamente la cobertura vegetal del área estudiada. Estas rutinas para la observación y diagnóstico del verde en la ciudad tienen un carácter objetivo, y en el caso de la teledetección multiespectral aprovechan las plataformas espaciales equipadas con sensores de elevada resolución espacial, cuya cobertura planetaria es muy amplia. Esto hace que los métodos analíticos llevados a cabo aquí sean extrapolables al caso de otros muchos territorios urbanos, cosa que se presta a establecer comparaciones de interés. Además, el cruce de datos de temperatura con la cubierta de vegetación permite observar la respuesta del clima urbano ante la desigual distribución de esta cubierta.

Key-words: Urban green, LiDAR, multispectral analysis, spatial analysis, urban climate

Abstract

In a context of impact of global change at the local scale, urban green is revealed today as a key piece in the planning and regeneration of climate and energy in contemporary urban territories at that scale. In its commitment to adapting to climate change, the Mediterranean city of Palma (Mallorca) needs to provide studies that account for the extent and spatial distribution patterns of green, as well as its morphometric characteristics. This communication presents an introductory study of the urban green of Palma, based on an analysis of the combination of LiDAR and multispectral remote sensing data. The LiDAR data allow to identify the tree structure, while the spectral analysis allows to detect the chlorophyll content in the plants, and therefore, in addition to complementing the LiDAR data, it allows mapping the vegetation cover of the studied area. These routines for the observation and diagnosis of urban green have an objective nature, and in the case of multispectral remote sensing, they take advantage of space platforms equipped with high spatial resolution sensors, whose planetary coverage is very wide. This makes the analytical methods carried out here extrapolated to the case of many other urban territories, which lends itself to making comparisons of interest. Furthermore, the crossing of temperature data with the vegetation cover allows us to observe the response of the urban climate to the uneven distribution of this cover.

1. Introducción

Es bien conocido que el mundo habitado es ya, en su mayoría, un entorno urbano, y la previsión de la Organización de las Naciones Unidas es que, en el año 2050, el 68% de la población habite en ciudades (United Nations, 2018). Con el fin de evitar en lo posible la pérdida completa del contacto directo con la componente natural que todo proceso de urbanización constriñe, las ciudades se han dotado históricamente de espacios en los que la naturaleza puede estar todavía presente, aunque sea de forma muy domesticada. Se trata del verde urbano, que adopta formas y tipos diferentes: parques, jardines y plazas vegetadas, así como el arbolado viario. Si bien el verde urbano ocupa los espacios abiertos libres de edificación, no necesariamente se trata de espacios públicos, pues el verde aparece también en patios, jardines o huertos de carácter privado. Los motivos por los que las ciudades retienen en su interior estos fragmentos vegetales son variados, pues se asume que el verde cumple una ineludible función ambiental e higiénico-sanitaria, a la que se une una función estética, recreativa y didáctico-educativa (García Lorca, 1989). A causa, sobre todo, de los problemas de contaminación atmosférica que acusan las ciudades actuales, hoy sobresalen las funciones ambiental e higiénica, ya que las cubiertas vegetales juegan un papel determinante como purificadoras del aire (Dwyer et al., 1992; Nowak et al., 2000; Priego, 2011). También tienen un efecto moderador de las temperaturas en condiciones climáticas de isla de calor (Ochoa, 2009; Brown et al., 2015; Moreno-García, 2019).

Por otra parte, de un tiempo a esta parte la cuestión del verde urbano viene siendo tema de estudio en no pocos trabajos relacionados con el urbanismo (Hough, 1998; Chiesura, 2004; Gómez-Lopera, 2005; Low et al., 2005), y el llamado análisis ecológico del paisaje (Rebele, 1994; Forman, 1995; Alberti, 2008). Tampoco son nuevos los trabajos de análisis espacial del verde utilizando imágenes satelitales y LiDAR aerotransportado (Chehata et al., 2009; Arranz et al., 2012; Bandyopadhyay et al., 2013; Niemeyer et al., 2014; Yan et al. 2015; Manonmani et al., 2018). Sin embargo, a causa de la relativamente reciente implantación de estas técnicas, junto con la necesidad de unos buenos conocimientos en torno a ella, su aplicación al verde de la ciudad es, en España, reducida. Una agencia de urbanismo aplicado como Barcelona Regional, en colaboración con el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC), ha utilizado técnicas de teledetección espacial con vistas a la elaboración del Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020 (2013). Para el caso de la ciudad de Palma, el uso de la teledetección aplicada al análisis del verde sólo ha sido avanzado por Bauzà (2017). Es por esto que la presente comunicación tiene como objeto abordar por primera vez el estudio del verde de esta ciudad, aprovechando las ventajas que ofrecen las imágenes satelitales multiespectrales de elevada resolución espacial y los ficheros LiDAR.

2. Área de estudio. Origen de la infraestructura verde de Palma

La ciudad de Palma, capital de las Islas Baleares, está situada al sur de la isla de Mallorca y constituye una típica ciudad mediterránea de carácter litoral y tamaño medio. Su población municipal reciente, según la revisión del Padrón del año 2019, es de 416.065 habitantes, aunque a los efectos del presente trabajo sólo interesa el territorio conformado por la ciudad propiamente dicha, cuya población es de 272.880 habitantes. Los límites de la misma puede decirse que son los que impone el semicírculo de la vía de circunvalación conocida como Vía de Cintura (Fig. 01).

A partir de un casco histórico amurallado hasta el año 1902, la trama urbana extramuros se ha venido construyendo mediante diversos procesos de expansión, el primero de los cuales es el que dio lugar al primer Ensanche, diseñado por Bernardo Calvet y aprobado en 1901. Su estructura es radial, de manera que los principales ejes viarios se constituyen como una prolongación urbana de las principales carreteras de la isla, dando lugar a cinco ejes primarios que salen de la ciudad hacia las poblaciones de Inca y Alcúdia, Manacor, Sóller, Santanyí y Andratx. Estas vías convergen radialmente hacia el centro geográfico e histórico de la ciudad. Los espacios medianeros entre los ejes quedan organizados mediante una tesela ortogonal y radial de manzanas y solares. El ensanche se ha construido en distintas fases, correspondientes

a seis sucesivos planes urbanísticos: 1901, 1943, 1964, 1973, 1985 y 1998. Comienza en el anillo interior de las Avenidas, cuyo trazado es el mismo que el del antiguo foso de las antiguas murallas, y llega hasta el primer cinturón de ronda de la Vía de Cintura, que ejerce, en cierto sentido, de moderna muralla, pues es una pieza física que hasta cierto punto detiene la expansión urbana.

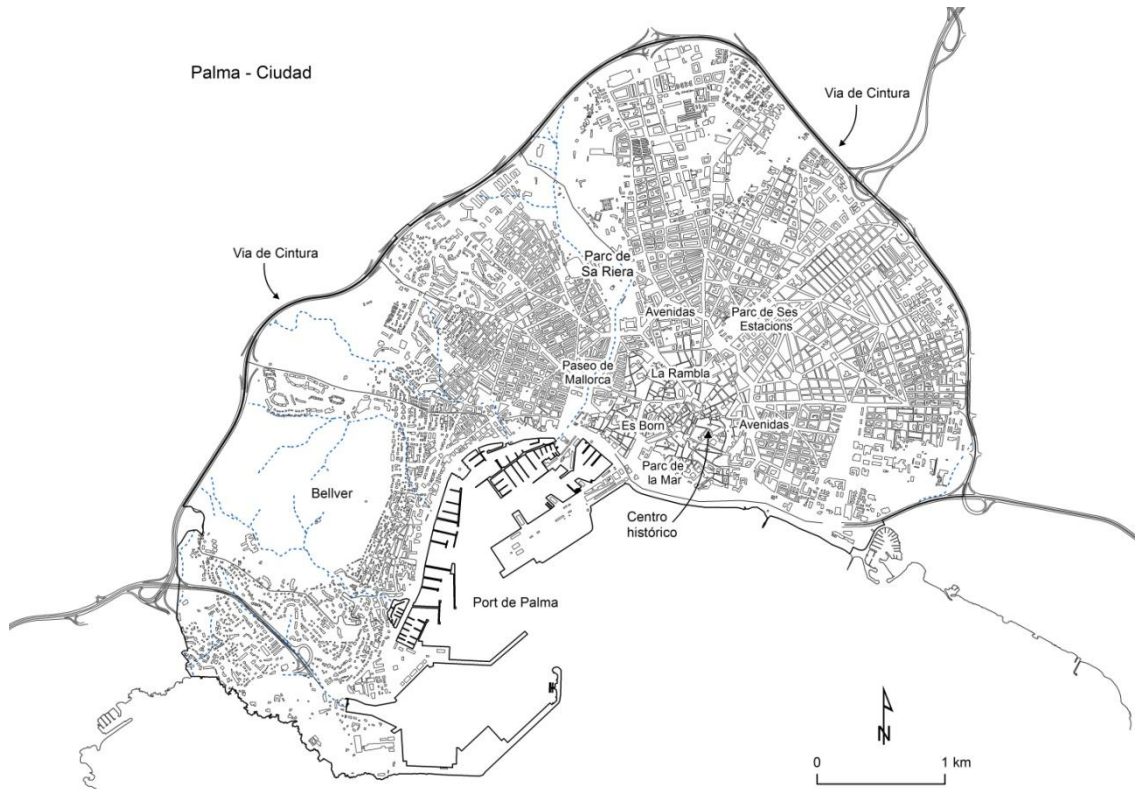


Fig. 01 Límites urbanos de la ciudad de Palma. Fuente: Elaboración propia a partir de datos cartográficos del Govern de les Illes Balears

Desde un punto de vista administrativo, la ciudad se organiza en 5 distritos (Centre, Nord, Llevant, Ponent y Platja de Palma) y 88 zonas estadísticas –barriadas–, 49 de las cuales pertenecen a los límites de la ciudad así descrita. De estas 49 barriadas, las más pobladas son las de Pere Garau (28.235 habitantes en 2019) y Bons Aires (18.999 habitantes), mientras que las menos pobladas pertenecen, en general, al centro histórico.

En lo que se refiere a la infraestructura verde, la ciudad dispone de un conjunto de parques, jardines y corredores de origen diverso, además del arbolado viario. Los primeros casos de verde urbano planificado –sin contar con los jardines de residencias privadas prediales y de recreo situadas en el espacio rural extramuros: Can Coll (1861) o Ca l’Indiano (1867), entre otros– son los del arbolado que acompaña ciertas vías urbanas y paseos públicos de herencia ilustrada, como el paseo extramuros de Jesús, el primero de estas características en Palma, proyectado en 1784. En la ciudad intramuros, la primera adecuación de La Rambla como paseo arbolado es del año 1823, mientras que el proyecto del paseo urbano del Born es de 1833 (Zaforteza, 1954). Más tarde se crean los jardines de la glorieta de la plaza de la Reina –primer jardín público de Mallorca, de 1863– y del Huerto del Rey, según un diseño inicial de 1851, y recuperado como jardín de nueva planta en 1957. Todavía en la ciudad intramuros, a estos espacios vegetados se fueron sumando ciertas plazas como la de Santa Eulàlia, de la Mercè, de l’Oli, de la Lonja o de las Drassanes, además de algunas calles con árboles como la de Unió.

En el primer ensanche palmesano, Calvet, su autor, emplazará el primer gran «jardín público» al noroeste de la ciudad, anexo al casco histórico, en la zona que bordea los márgenes del curso hídrico de Sa Riera y colindante con el antiguo paseo de Jesús. Con una superficie inicialmente prevista de 16,9 Ha, este gran parque ha visto reducida sustancialmente no sólo su extensión original sino también su superficie verde, fagocitada por distintos procesos edificatorios. Nuevos procesos de este tipo también hicieron desaparecer el segundo «jardín público», de 3,12 Ha, programado por Calvet y emplazado al oeste de la ciudad, detrás del arrabal de Santa Catalina y coincidente con otro cauce de agua –el *torrent* de Sant Magí–.

Para tratar de solucionar el imperfecto desarrollo constructivo del primer ensanche, en 1943 se aprueba el Plan Alomar, con el que además se intenta solventar el déficit de zonas verdes en el interior del ensanche, sobre todo en su mitad oriental. Este Plan programa unas zonas calificadas como de «edificación extensa», destinadas a residencias unifamiliares y plurifamiliares siempre rodeadas por un jardín, como así ocurrió en los núcleos de El Amanecer, Son Armadans o El Terreno. El Plan apenas se ejecutó, y en 1964 aparece un Plan General cuyo objeto es solucionar las urgentes necesidades de residencia provocadas por el aumento de la población. El resultado fue un plan desarrollista que incrementó sustancialmente las alturas permitidas de la edificación, lo que comportó la sobredensificación edificatoria en muchos sectores del ensanche, además de un déficit de equipamiento verde. En 1973 se aprueba un nuevo Plan, firmado por Ribas Piera, quien denuncia la infradotación y devaluación a que había llegado buena parte del ensanche, y cuyo objetivo es promover «un sistema de espacios verdes –tan urgente en Palma– y el necesario equipo comercial y escolar; todo ello, propuesto en términos de gran generosidad de espacios, aunque paradójicamente invisible en los planos» (Ribas Piera, 1973:49). Este designio no pudo materializarse, en parte por la falta de interés económico por parte de los promotores, y en parte por la Crisis del Petróleo.

El Plan General de Ordenación posterior es de 1985, el primero de la reciente democracia española, con el que se propone la protección del suelo no urbanizable, y en definitiva detener el crecimiento de la ciudad. Para ello se emprende un plan de movilidad y un plan de dotación de equipamientos y servicios mejor y más homogéneamente distribuidos. También se promueve la rehabilitación de ciertas áreas degradadas del centro histórico mediante Planes Especiales de Reforma Interior (PERIs), aplicados con éxito en barrios como el Puig de Sant Pere, Sa Calatrava o Sa Gerreria. La dotación de equipamientos del Plan de 1985 incluía de forma preferente los espacios verdes, principalmente en los sectores urbanos más periféricos. Fruto de este Plan es la creación de un gran parque público urbano –la Cuña Verde de Sa Riera o *Falca Verda*, en catalán–, como forma de restituir el gran «jardín público» previsto en el Plan Calvet de 1901. El Plan vigente de 1998 reformula ciertas actuaciones previstas por el de 1973, aunque mantiene la promoción del verde urbano.

Hoy, en cuanto a dimensiones y características formales, son tres las principales áreas verdes de Palma: el mencionado parque y corredor de Sa Riera-*Falca Verda* (26,4 Ha), el Parc de la Mar (9,1 Ha) –situado en el frente marítimo bajo la Catedral–, y el Parc de Ses Estacions (3,7 Ha), situado frente a la céntrica plaza de España, y que constituye un espacio ajardinado y vallado que en su momento perdió la oportunidad de transformarse en parte de un gran corredor verde (el Parc de les Vies) que arrancara de la plaza de España hasta alcanzar el polígono de Son Fuster. Ninguno de estos espacios ejerce eficazmente de ‘pulmón’ vegetal, función que sólo el bosque de Bellver (110 Ha), al oeste de la ciudad, puede desempeñar, pero se trata de un espacio demasiado separado del centro de la ciudad y es poco accesible (Fig. 02).

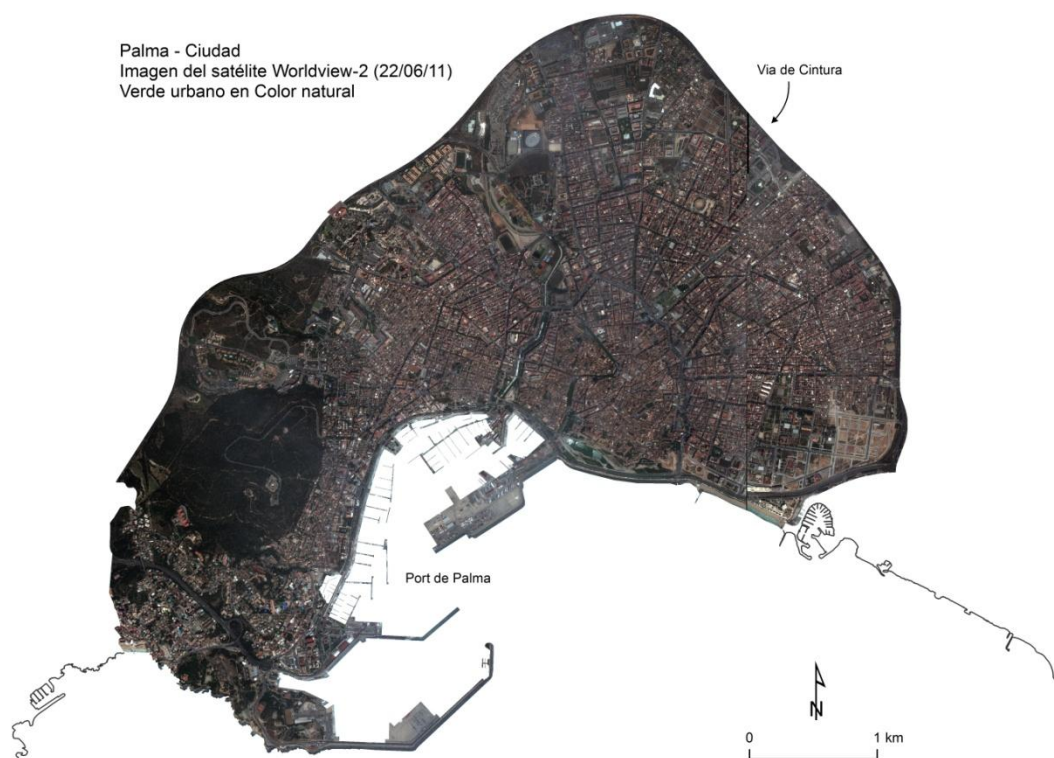


Fig. 02 Palma-Ciudad. Imagen satelital (color natural). Fuente: Elaboración propia a partir del satélite WorldView-2

3. Método y materiales

La representación cartográfica y el examen de la distribución espacial del verde urbano de Palma, además de sus características morfométricas simples, se ha realizado aprovechando las ventajas analíticas que ofrece la teledetección multiespectral y la tecnología LiDAR (Lillesand et al., 2004). Mientras que las técnicas de teledetección multiespectral permiten obtener datos de la superficie terrestre de forma remota, mediante satélites u otras plataformas dotadas con sensores que capturan diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, la tecnología LiDAR permite generar modelos digitales del terreno gracias a su capacidad de medir distancias. Esto facilita no sólo medir y realizar seguimientos temporales de los diversos fenómenos terrestres (temperatura, humedad del suelo, nubosidad, etc.), sino también identificar y realizar seguimientos de muy diferentes entidades espaciales de la superficie terrestres, tanto naturales como de origen antrópico, tales como infraestructuras urbanas y de transporte, incendios, cultivos, láminas de agua o cubiertas vegetales, entre muchas otras.

Cada entidad espacial emite o refleja radiación de un modo diferencial y característico, de ahí que cada una tenga un patrón de reflectancia diferenciado, es decir una signatura espectral distintiva. Esto es lo que permite, en último término, su identificación por los diferentes sensores –bien visual o bien algorítmica–. En el caso de la vegetación, su curva de reflectancia espectral muestra un mínimo en la parte visible del espectro electromagnético, exceptuando, dentro de él, un pequeño pico en el verde, porque la clorofila absorbe fuertemente la luz azul (B) y roja (R), mientras que refleja la verde (G), de ahí que la vegetación saludable la percibamos en este color. Por el contrario, la curva de reflectancia de las plantas presenta un máximo en el infrarrojo cercano, entre 0,7 y 1,3 μm de longitud de onda, de ahí que sea la banda del infrarrojo de los sensores remotos satelitales la más adecuada para identificar la vegetación.

Para el caso de nuestro análisis se ha contado con una imagen del satélite WorldView-2, registrada el día 22 de junio de 2011 (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>). Por la fecha de la toma, la imagen permite captar la vegetación caducifolia cuya pérdida de hojas se produce en otoño. Su resolución espacial es de 1,6 m por píxel en las bandas multispectrales, que han sido combinadas con la banda pancromática para obtener una resolución final de 0,4 m. Las bandas utilizadas son la 7 (infrarrojo cercano), 5 (rojo), 3 (verde) y 2 (azul). Para la identificación e interpretación de la cubierta vegetal, la imagen ha sido tratada con dos combinaciones RGB para obtener una imagen de color natural (combinación de bandas 5-3-2) y una imagen infrarroja (combinación de bandas 7-5-3).

A partir de esta imagen se ha calculado el índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1974). Éste es típicamente usado para medir, entre otras utilidades, el crecimiento de las plantas, su estado de salud o su fenología. Su cálculo se efectúa partiendo de la información de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, mediante la fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo}) / (\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo})$$

Para calcular el NDVI se ha utilizado la banda 7 (770–895 nm) y la banda 5 (630–690 nm), bandas de infrarrojo cercano y rojo, respectivamente, del satélite WorldView-2. Se ha usado un umbral de NDVI > 0,2 para detectar la presencia de vegetación y representarla en diferentes clases. Una planta vigorosa da como resultado un valor de NDVI elevado, pues refleja gran parte de la radiación en el infrarrojo cercano y poca radiación en el rojo. Lo contrario ocurre en el caso de vegetación enferma o que padezca estrés hídrico. Al tratarse de un índice normalizado, los valores oscilan entre -1 y 1. En general, las cubiertas artificiales y las láminas de agua presentan un índice NDVI < 0, mientras que los suelos desnudos o la vegetación muerta presenta un índice NDVI 0 < NDVI < 0,2. Las zonas con vegetación activa dan como resultado un índice NDVI superior a 0,2, pudiéndose establecer la siguiente clasificación, utilizada por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*:

0,2 < NDVI < 0,4: Zonas de vegetación poco vigorosa o dispersa.

0,4 < NDVI < 0,6: Zonas de vegetación vigorosa y abundante.

NDVI > 0,6: Zonas de vegetación muy densa y vigorosa.

En lo que se refiere a las nubes de puntos LiDAR (*Light intensity Detection and Ranging*), éstas se obtienen mediante un sensor activo que envía pulsos de luz láser hacia un blanco normalmente del terreno. La medida del tiempo que tarda la luz en el camino de ida y vuelta se emplea para determinar la distancia entre el sensor y el objeto iluminado. Además de esto, los cambios en las propiedades de la luz (su intensidad o su color) permiten determinar algunas propiedades físicas del objeto, o ciertas propiedades del medio atravesado. Los datos LiDAR, en función de la densidad de puntos, tienen una elevada resolución espacial, siendo una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas para la generación de Modelos Digitales del Terreno de gran precisión y densidad de cotas. Por otra parte, el registro del primer pulso captura la parte más alta de los objetos del terreno (por ejemplo, la copa de los árboles o las azotas de los edificios), mientras que el registro del último eco se usa para detectar la superficie del suelo. La diferencia entre ambos registros permite calcular la altura de esos objetos (McManamon, 2015).

Cada punto LiDAR está clasificado por categorías, es decir por el tipo de objeto reflejado por el pulso láser. Los códigos de clasificación para el formato de datos LAS están definidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS), en incluyen categorías como Base, Vegetación baja, Vegetación media, Vegetación alta, Edificio, Ferrocarril, Superficie de la carretera o Torre de transmisión, entre otras. Para el caso del análisis de la cobertura verde urbana de la ciudad de Palma, se han utilizado ficheros LiDAR correspondientes al vuelo de 2014, del Instituto Geográfico Nacional, con una densidad de 0,6

puntos/m², lo que constituye una densidad muy baja para la representación precisa de la vegetación en un entorno urbano. Otro problema es el que tiene que ver con ciertos errores de comisión y omisión. En el caso de Palma, estructuras que corresponden a mástiles de embarcaciones situadas en el puerto, o a sombrillas colocadas en las playas, aparecen clasificadas de forma errónea como vegetación. En cuanto a los errores de omisión, en ocasiones los datos LiDAR no alcanzan a detectar algunas de las estructuras arbóreas que aparecen confinadas en el interior de ciertos claustros o patios cerrados, rodeados por edificios. En cambio, la utilización de la imagen satelital y el cálculo del índice de vegetación detecta satisfactoriamente la presencia de vegetación en esos patios, si bien no permite determinar su altura.

Por otra parte, en un medio urbano, la identificación de árboles mediante ortofotografías aéreas presenta el problema del efecto de paralaje, que produce un desplazamiento radial de las imágenes hacia adentro o hacia afuera con respecto al punto nadiral de la fotografía. Esto hace que algunos árboles puedan quedar ocultos por la aparente inclinación hacia ellos de los edificios, y por tanto la ortofotografía resulta poco adecuada para localizar la totalidad de los árboles. Esto se resuelve con el uso de datos LiDAR, pues éstos son obtenidos mediante un lanzamiento puramente nadiral de los pulsos láser, siempre perpendiculares al terreno. Por lo demás, los datos LiDAR también resuelven el problema de los objetos vegetales cuando éstos quedan ocultos por las sombras de otros objetos más grandes, básicamente la sombra de los edificios. Aunque la imagen del satélite WorldView-2 que hemos utilizado es del 22 de junio, en que la inclinación del Sol es menor y menores son las sombras generadas, esto no evita por completo cierto ocultamiento de la vegetación por estas sombras eventuales.

4. Resultados y discusión

Para el caso del análisis de la cobertura verde urbana de la ciudad de Palma se han utilizado dos fuentes de información: una imagen multispectral de satélite y ficheros de datos LiDAR. De acuerdo con el análisis multispectral, el verde urbano de Palma ocupa una superficie de 539,2 hectáreas de un total de 1.831,2, es decir el 29,4% de la ciudad (Tabla 1 y Fig. 03). El examen por zonas estadísticas -barriadas- permite descubrir la desigual distribución espacial del verde, observándose, a grandes rasgos, una transición ascendente desde el centro histórico hacia los sectores occidentales y septentrionales exteriores de la ciudad, colindantes con los límites de la misma. Así, las barriadas mejor dotadas de cobertura vegetal son, en números absolutos y en orden decreciente, las de Sa Teulera (63,9 hectáreas), La Bonanova (58,7 Ha), Cala Major (44,9 Ha), Son Dureta (40,7 Ha), Son Cotoner (19,1 Ha), Nou Llevant (15,9 Ha) o Camp Redó (15,3 Ha). Hay que decir que la zona estadística de Bellver, con una superficie verde de 102,1 Ha, supera ampliamente los valores anteriores debido a que se trata de una zona forestal formada por un gran bosque de pinos, si bien el Instituto de Estadística de las Islas Baleares (IBESTAT) la considera, a efectos de estadística poblacional, unida a la barriada de El Terreno (9,3 Ha de superficie vegetada). En el lado opuesto, las barriadas con menos cobertura verde son las de La Missió (0,4 Ha), Montision (0,4 Ha), Sant Nicolau (0,5 Ha), Cort (0,5 Ha), Can Capes (0,6 Ha), Can Pere Antoni (0,7 Ha) o Jaume III (0,9 Ha).

Zona Estadística (Barrio)	Superficie (Ha)	Superficie verde (Ha)	Superficie verde (%)	Población (2019)
Bellver	110,4	102,1	92,5	
Sa Teulera	89,8	63,9	71,2	1.747
La Bonanova	91,1	58,7	64,5	3.023
Son Dureta	74,2	40,7	54,9	2.158
Cala Major	121,9	44,9	36,8	4.943
Amanecer	20,3	6,4	31,4	602
Son Dameto	50,1	14,8	29,5	7.438
Son Cotoner	66,2	19,1	28,9	12.102

Es Jonquet	5,8	1,7	28,8	637
Sa Calatrava	9,5	2,4	25,3	835
Son Armadans	50,6	11,3	22,4	7.369
Son Oliva	28,2	6,1	21,5	6.224
El Terreno	43,3	9,3	21,4	5.666
Bons Aires	70,6	15,0	21,2	18.999
Arxiduc	27,3	5,6	20,5	6.862
Es Fortí	30,2	6,1	20,2	6.875
Sant Jaume	13,7	2,7	19,9	1.708
Nou Llevant	81,8	15,9	19,5	6.503
Puig de Sant Pere	5,0	1,0	19,2	461
Son Espanyolet	42,6	8,0	18,8	7.212
Son Gotleu	31,6	5,9	18,8	9.553
L'Olivera	37,8	7,0	18,6	3.542
Porto Pi	41,7	7,5	18,1	2.531
Cas Capiscot	60,5	10,9	18,0	8.827
Camp Redó	92,8	15,3	16,4	14.064
Santa Catalina	35,3	5,5	15,6	8.394
Sa Llotja-Born	11,2	1,6	14,6	1.649
Son Canals	18,2	2,5	13,5	5.855
Plaça de Toros	49,6	6,6	13,3	15.591
Can Capes	5,3	0,6	12,2	1.740
Foners	55,3	6,4	11,5	16.363
La Seu	9,0	1,0	11,5	582
Pere Garau	68,0	7,3	10,7	28.235
Camp d'en Serralta	31,3	3,2	10,1	12.481
Es Mercat	13,4	1,3	10,0	2.391
La Soledat (Sud)	10,8	1,1	10,0	2.348
Zona Portuària	60,9	6,1	9,9	29
Marqués de Font Santa	20,6	2,0	9,7	6.526
Can Pere Antoni	7,2	0,7	9,5	180
Hostalets	10,6	1,0	9,1	2.536
Plaça dels Patins	17,4	1,6	9,1	3.837
La Soledat (Nord)	31,0	2,7	8,6	8.385
Es Sindicat	20,0	1,7	8,4	4.084
Jaume III	11,5	0,9	8,2	2.519
Son Fortesa (Sud)	16,9	1,3	7,9	3.775
Cort	7,0	0,5	7,7	1.275
Monti-Sion	7,5	0,4	5,8	1.055
Sant Nicolau	8,4	0,5	5,8	1.500

verde pertenecen al antiguo casco histórico intramuros se explica, en primer lugar, por la particularidad de su trama urbana, de carácter medieval, con calles estrechas que no han favorecido la plantación de árboles. Tampoco lo favorece la alta densidad edificatoria en este casco, de manera que la presencia de vegetación se limita a ciertas plazas, plazoletas y recodos. La excepción a este déficit estructural de vegetación son los parques y jardines públicos: La Misericòrdia, Huerto del Rey, Jardí del Bisbe o Parc de la Mar. También son una excepción los anchos paseos de origen decimonónico, ya comentados, de Es Born o La Rambla, típicamente arbolados con plátanos (*Platanus hispanica*). Estos paseos se crearon sobre el antiguo cauce del *torrent* de Sa Riera, hoy inactivo, cuyo meandro atraviesa la parte más baja del casco histórico hasta su anterior desembocadura en la actual plaza de la Reina, de manera que la totalidad de este meandro aparece vigorosamente vegetada (Fig. 04 y Fig. 05).

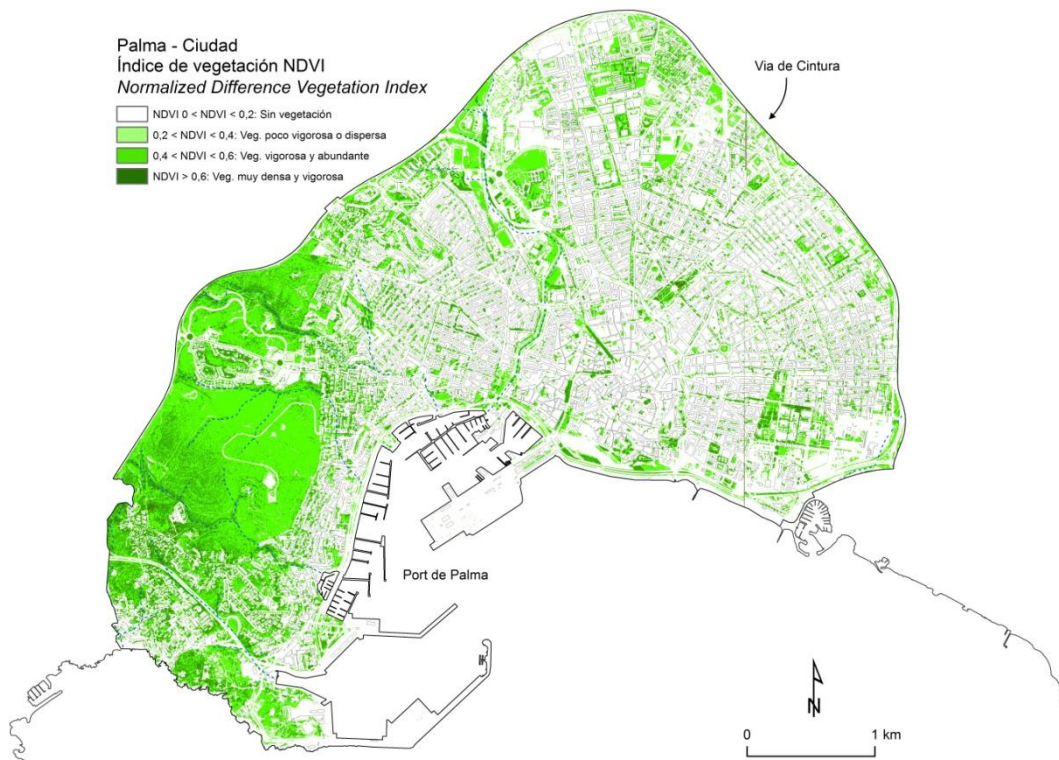


Fig. 04 Palma (Mallorca): Cobertura vegetal a partir del cálculo del índice de vegetación NDVI. Fuente: Elaboración propia a partir de una imagen multiespectral del satélite WorldView-2

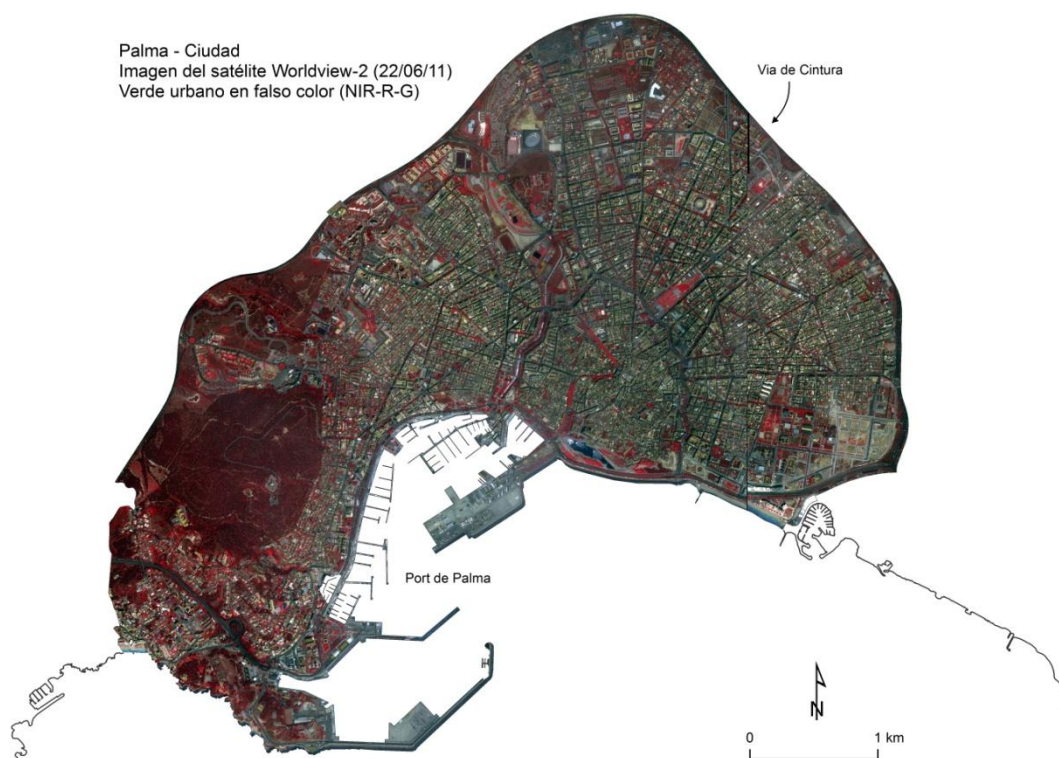


Fig. 05 Palma (Mallorca): Cobertura vegetal en falso color (combinación Infrarojo Cercano-Rojo-Verde). Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de una imagen multiespectral del satélite WorldView-2

El índice de vegetación NDVI calculado a partir de la imagen de satélite también permite detectar la vegetación presente en los jardines particulares de pequeño tamaño, cuando éstos se habilitan en el interior de patios abiertos, o cuando se mezclan con los antiguos huertos conventuales (Santa Clara, Santa Magdalena, los Agustinos o Santa Elisabet de Hungria-las Jerónimas). Más que en ningún otro barrio del casco antiguo, los buenos resultados de Sa Calatrava (25,3%) se benefician del relevante revestimiento verde de las plazas de la Porta des Camp o Llorenç Villalonga, pero también, inusualmente, del notable equipamiento vegetal de los claustros conventuales (conventos de Santa Elisabet y de Santa Clara), así como el de los jardines interiores privados, que en este barrio son de mayores dimensiones.

En lo que se refiere al extenso ensanche, hay que empezar mencionando la vía de circulación de las Avenidas, que bordea el casco histórico, y en la que en toda ella se presenta el verde, aunque con distinta densidad, dependiendo de los tramos. El tramo mejor dotado es el de la Avenida Gabriel Alomar i Villalonga, en el lado oriental. Es en los grandes parques limítrofes con las Avenidas en los que el verde urbano se hace definitivamente presente: el Parc de Ses Estacions, unido a la plaza de España, y el Parc de Sa Riera-Falca Verda al noroeste de la ciudad, cuya mancha se extiende hasta el límite que impone la Vía de Cintura.

Aunque todas las vías interiores del primer ensanche aparecen más o menos arboladas, en ciertas partes se advierte aún un déficit de verde que se explica por la estrechez de las calles, anormal para un ensanche urbano con el que se pretendía la descongestión del centro histórico. A esto se suma la progresiva colmatación del suelo por nuevos edificios, y en definitiva su artificialización. Esa carencia fue ya denunciada por ciertos urbanistas activos durante la primera mitad del siglo XX (Ladaria, 1992). No es extraño, por tanto, que todavía hoy sean los barrios de la primera zona ensanchada los que presentan menos superficie verde: Foners, Pere Garau, Marquès de Fontsa, Plaça de Toros, Camp d'en Serralta, Santa Catalina o Camp Redó. Aunque también pertenece al primer ensanche, el barrio de Arxiduc tiene valores más elevados de superficie verde porque se beneficia de su vinculación formal con el Parc de Ses

Estacions. Lo mismo ocurre en el caso de Bons Aires o Es Fortí, cuyo verde proviene principalmente de la localización en ellos del gran parque de Sa Riera. En cualquier caso, el espacio vegetado del ensanche adquiere aquí, sobre todo, la forma de red arterial, en cuyos nodos de confluencia se forman las plazas circulares o cuadrangulares en las que el verde ocupa su lugar: Pere Garau, García Orell, Miquel Dolç, Guillem Moragues, Cardenal Reig, Abu Yahya, Santa Pagesa, Güell, Fleming, etc. El caso del Paseo de Mallorca, en el límite oeste del casco histórico, resulta digno de mención, pues en él son más altos los valores del índice de vegetación. Se trata de un ancho corredor viario en medio del cual se encaja el actual curso hídrico de Sa Riera, semipermanente. Todo el corredor está arbolado, sobre todo en su margen izquierda, en la que además hay piezas de suelo más o menos extensas con césped. En resumen, 13 de las 50 zonas estadísticas de Palma tienen una extensión de cubierta vegetal inferior al 10% del total de su superficie, 20 zonas tienen entre un 10% y un 20%, 10 zonas entre un 20% y 30%, y hay 6 zonas que superan el 30%.

En relación con la cobertura estrictamente arbórea de Palma (Fig. 06), el manejo de datos LiDAR, exceptuando los errores de omisión y de comisión antes mencionados, ha facilitado una representación cartográfica de los árboles bastante consistente con la realidad, aunque la baja densidad de puntos no permite realizar una interpolación precisa para generar un modelo digital que permita un análisis espacial similar al realizado con la imagen del satélite WorldView-2. En cualquier caso, la representación de la cubierta arbórea queda bien resuelta cuando se representa a la escala de la ciudad en su conjunto. A escalas de detalle no siempre se consigue identificarla. La técnica permite comprobar la distribución de los árboles dentro de los grandes parques, y, por tanto, consignar los posibles déficits de sombra. Así, por ejemplo, el parque de Ses Estacions sólo posee una masa compacta de árboles en la parte central. El parque no periférico más grande de Palma, el de Sa Riera o Falca Verda, tiene una buena dotación arbórea, pero ésta no suele presentarse formando pequeños bosques, sino de una forma más bien diseminada.



Fig. 06 Palma (Mallorca): Cobertura arbórea a partir de datos LiDAR. En la Zona Portuaria aparecen errores de comisión. Fuente: Elaboración propia a partir de datos LiDAR del año 2014, cedidos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN)

En cuanto al arbolado viario, hay vías anchas del primer ensanche bien arboladas (31 de diciembre, Faust Morell, Arquebisbe Arpareg, Arquitecte Bennazar, entre otras), y, en cambio, hay otras igualmente anchas pero con insuficiencia de árboles (General Riera, Carretera de Manacor, Alfons El Magnànim, entre otras). El déficit suele ser más acusado en las calles más estrechas del ensanche, o bien sus árboles son de menor porte. La vía principal de las Avenidas aparece comparativamente muy poco arbolada, sobre todo en los tramos en los que se retiró el paseo central con el que hacia 1910 quedó inaugurada esta gran ronda. Sólo se conserva en el sector de la Avenida Gabriel Alomar i Villalonga, el único que mantiene la forma original de bulvar, aunque el paseo central original ya no ejerce como tal, pues su función actual es de aparcamiento. En relación con las especies vegetales de tipo arbóreo dominantes en Palma, el Plan de gestión y análisis del riesgo del arbolado viario, encargado por el Ayuntamiento de Palma y fechado en 2012, cita 81 especies distintas de árboles. El almez (*Celtis australis*) y el platanero (*Platanus hispanica*) figuran como los más abundantes: 15,5% y 14,4% respectivamente. Le siguen la acacia del Japón (*Shorea japonica*), con un 8,9%, la melia (*Melia azedarach*), con un 6,5%, y la tipuana (*Tipuana tipu*), con un 5,8%. La palmera datilera (*Phoenix dactylifera*) apenas supera el 3%.

En relación con la dotación zonal de verde urbano en Palma, también cabe preguntarse por la población de cada barrio que se ve beneficiada por la presencia en él de espacios verdes, ya que estos se tienen como un factor de calidad de vida en las ciudades (Gómez-Lopera, 2005). Esto se resuelve mediante el indicador $m^2SV/hab.$, que se define como la superficie de parques y jardines y otros espacios públicos dotados de cobertura vegetal del ámbito urbano, en relación al número de habitantes. La Organización Mundial para la Salud (OMS) recomienda un mínimo de $10 m^2$, siendo recomendable una dotación de $15 m^2$ por habitante. Si se utiliza el censo de población del año 2019 correspondiente a cada unidad administrativa, se comprueba que la barriada de Sa Teulera es la mejor posicionada, con $365,7 m^2SV/hab.$ Le siguen La Bonanova ($194,2$), Son Dureta ($188,7$) y el Amanecer ($106,0$). En el lado opuesto se sitúan La

Missió (2,3 m²SV/hab.), Camp d'en Serralta (2,5) o Pere Garau (2,6). Sin contar con Bellver, 26 barriadas de Palma están por debajo de los 10 m² de dotación verde por habitante recomendada por la Organización Mundial para la Salud, y 22 están por encima de ese valor.

5. Verde urbano y clima local en Palma

Son bien conocidas las especiales características físicas de un medio urbano como conformadoras de un clima o microclima singularizado (Oke, 1980; Lansberg, 1981). La más alta capacidad calorífica de los materiales de construcción empleados en la ciudad, el incremento de la absorción de radiación solar debido a su más eficaz captura causada por la geometría urbana, así como la producción aumentada de calor antropogénico, son factores de peso para que la ciudad se comporte de manera distinta desde un punto de vista climático, y en concreto desde un punto de vista térmico (Martín-Vide et al., 2017). Ahora bien, si la distribución de los valores de temperatura no es homogénea a lo largo y ancho del espacio urbano, es porque éste presenta discontinuidades tanto de tipo morfológico como de cobertura del suelo. Incluso en el caso de plantas adosadas a las fachadas y tejados de los edificios urbanos, la vegetación siempre juega a favor de la reducción de la temperatura (Spiller, 1993) y resulta siempre beneficiosa para mejorar el confort térmico en climas mediterráneos como el de Palma (Givoni, 1989).

También es conocido el efecto de depuración del aire atribuido a la vegetación urbana y especialmente los árboles, que eliminan contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) o las partículas PM10. Los árboles capturan y almacenan dióxido de carbono atmosférico, y para esto son especialmente eficaces el eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), la palmera datilera (*Phoenix dactylifera*), el aloe (*Aloe arborescens* Mill.), la bellasombra (*Phytolacca dioica* L.), el plátano (*Platanus orientalis* L. var. *acerifolia*) o el sauce blanco (*Salix alba*), entre otros (Chaparro y Terradas, 2009). Además de esto, determinadas configuraciones arboladas ocasionan cambios en la capa límite y en los patrones del viento, reduciendo su velocidad y por tanto mejorando el confort climático de los peatones.

En la ciudad de Palma, los espacios mejor equipados con vegetación se han demostrado muy efectivos como atenuadores de la temperatura, efecto bien consignado bajo condiciones de isla de calor nocturna, un fenómeno que no es particularmente bien recibido en esta ciudad, con un clima caluroso en los meses centrales del año. También son eficaces mitigadores de las temperaturas más altas las superficies ocupadas por agua, incluso en el caso de los cauces que desplazan agua sólo de forma intermitente. Los principales focos de frescor en Palma están emparejados tanto con las eventuales depresiones del terreno como con la presencia de vegetación arbórea formando pequeñas o grandes masas. El paseo arbolado de La Rambla, en el centro del casco histórico, es un caso claro, pues allí se une su ajuste morfológico a un antiguo cauce y la cadena de árboles de gran envergadura –*Platanus hispanica*– plantados a ambos lados de la vía. En el Paseo de Mallorca, por donde discurre el *torrent* de Sa Riera, y en general en todos los demás cauces urbanos (Sant Magí, Mal Pas, Aigo Dolça), los flujos catabáticos contribuyen al enfriamiento nocturno de sus inmediatas áreas de influencia. Así, Alomar-Garau y Llop-Garau (2018) consignan una diferencia de temperatura nocturna entre el Paseo de Mallorca y las Avenidas de hasta 2,5° C. También consignan cambios súbitos de hasta 1° C entre la plaza de los Patines y el contiguo paseo arbolado de La Rambla, debido al efecto topográfico y al vegetal.

La reducción de las temperaturas es más efectiva en los casos de masas de árboles más grandes que generan grandes sombras, como ocurre en los principales parques de la ciudad (Parc de Sa Riera, Parc de Ses Estacions, Parc de Krekovic), pero también en parques o jardines de menor dimensión como el de Ses Fonts, Son Costa-Sa Fertilizadora (Son Oliva), Can Simonet (Camp Redó), Orson Welles (Son Gotleu), Sa Quarentena (El Terreno) o el Huerto del Rey, sin contar las más extensas zonas verdes que se abren en todo el sector occidental de la ciudad. Efectos microclimáticos de interés también se generan en ciertos focos verdes como los de la plaza Francesc Garcia Orell (plaza de las Columnas), Llorenç Villalonga o

Porta des Camp, así como también en vías anchas como la calle 31 de Diciembre, la del Arquitecto Bennàzar o el paseo del Born, por poner sólo unos cuantos ejemplos representativos.

6. Conclusiones

Mediante el manejo experto de una imagen del satélite WorldView-2 y de datos LiDAR, se ha podido determinar, de manera inédita, la cubierta vegetal conjunta de la ciudad de Palma. Ambas tecnologías presentan unas características que las hacen aptas para este propósito, si bien la baja densidad de puntos de los datos LiDAR genera errores de omisión y comisión que dificultan un análisis espacial preciso. Como era de esperar, la mayor presencia de vegetación se observa típicamente en las zonas de Palma habilitadas como parques ajardinados, plazas, calles arboladas e incluso pequeños jardines ocupando patios interiores, además de las pequeñas y limitadas plazoletas del centro histórico. En ciudades como esta, de clima cálido y seco en verano, el confort climático aparece directamente relacionado con la presencia de verde, de ahí que la localización de áreas deficitarias de vegetación o con escasez de arbolado resulte muy útil a la hora de planificar la ciudad con vistas a su adaptación al calentamiento global, pero también a su equipamiento estético.

Por barriadas, se observa una distribución espacial del verde según la cual, en general, su presencia aumenta radialmente desde el centro hacia los sectores periféricos occidentales y, en menor medida, septentrionales. Esta lógica es coherente con el hecho de que en el centro de la ciudad la estrechez de las calles del casco histórico, de trazado medieval, no ha favorecido la plantación de árboles, pues dificultan significativamente la circulación de peatones. Por el contrario, el tipo de urbanización más abierta en los barrios exteriores ha favorecido la creación de zonas verdes y una mejor dotación de árboles, sobre todo los plantados en hilera a ambos lados de las calles. Grandes barriadas perimetrales del sector occidental (La Bonanova, Cala Major, Sa Teulera, Son Dureta) se benefician de su proximidad o su vinculación con los espacios naturalizados pre-existentes, que a veces se presentan en forma de grandes masas arbóreas como la del bosque de Bellver, en el extremo oeste de la ciudad. Su consideración como ‘pulmón’ de la ciudad es engañosa, pues su situación periférica lo hace poco accesible, y su contribución a la mitigación de la contaminación atmosférica es poco relevante para las áreas más contaminadas del centro.

Como líneas futuras de trabajo, valiéndose de las ventajas analíticas que ofrecen los métodos de clasificación supervisada, se podrían identificar y localizar las diferentes especies de árboles. Asimismo, ya que la localización de las zonas verdes en Palma debería satisfacer idealmente la demanda de toda su población, la cartografía obtenida en el presente trabajo podría utilizarse para el análisis de la accesibilidad a esas zonas, clasificándolas, además, por su titularidad pública o privada.

7. Bibliografía

- Alberti, M. 2008. *Advances in urban ecology. Integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. Seattle: Springer Science Business Media.
- Alomar-Garau, G. y Llop-Garau, J. (2018). La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 392–418.
- Arranz, J.J., Ormeño, S. y Vicent, J.M. 2012. Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos LiDAR en entornos urbanos: discriminación entre vegetación y edificaciones. I Congreso Iberoamericano de Geomática y Ciencias de la Tierra. X Topcart 2012, Madrid, 16-19 octubre.
- Ajuntament de Barcelona. 2013. *Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020*. Barcelona: Medi Ambient i Serveis Urbans-Hàbitat Urbà, Ajuntament de Barcelona.
- Bandyopadhyay, M., van Aardt, J.A. y Cawse-Nicholson, K. 2013. Classification and extraction of trees and buildings from urban scenes using discrete return LiDAR and aerial color imagery. En *SPIE Defense, Security, and Sensing, Anonymous International Society for Optics and Photonics* (873105-873105-9).
- Bauzá Llinàs, J. 29 de julio de 2017. La teranyina verda de ciutat. Una aproximació satel·litària a la presència de vegetació als carrers de Palma. *Ara Balears*.
- Brown, R. D., Vanos, J., Kenny, N., Lenzholzer, S. 2015. Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning*, 138, 118–131.
- Chaparro, L. y Terradas, J. 2009. *Serveis Ecològics del Verd Urbà a Barcelona*. Barcelona: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Chehata, N., Guo, L. y Mallet, C. 2009. Airborne lidar feature selection for urban classification using random forests. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39 (Part 3/W8), 207-212.
- Chiesura, A. 2004. The Role of Urban Parks for the Sustainable City. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129-138.
- Czembrowski, P. y Kronenberg, J. 2016. Hedonic pricing and different urban green space types and sizes: Insights into the discussion on valuing ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 146, 11-19.
- Dwyer, J.F., McPherson, E.G., Schroeder, H.W., Rowntree, R.A. 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture*, 18(5), 227-234.
- Forman, R.T.T. 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3), 133-142.
- García Lorca, A.M. 1989. El parque urbano como espacio multifuncional: origen, evolución y principales funciones. *Paralelo 37º*, 13, 105–111.
- Givoni, B. 1989. *Urban design for different climates (Report WMO-TD, 346)*. World Meteorological Organization.
- Gómez-Lopera, F. 2005. Las zonas verdes como factor de calidad de vida en las ciudades. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, XXXVII(144), 417-436.
- Hough, M. 1998. *Naturaleza y ciudad: planificación urbana y procesos ecológicos*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Ladaria Bañares, M.D. 1992. *El ensanche de Palma. Planteamiento del tema, problemática, construcción y valoración de un nuevo espacio urbano, 1868-1927*. Palma: Ajuntament de Palma.
- Lansberg, G.H. 1981. *The Urban Climate*. New York: New York Academic Press, 275.
- Lillesand, Th., Kiefer, R. y Chipman, J. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York: Wiley (Fifth Edition).
- Low, N., Gleeson, B., Green, R., Radović, D. 2005. *The Green City. Sustainable homes, Sustainable suburbs*. UNSW Press.
- Manonmani, S., Honnaik, S. y Rangaswamy, S. 2018. *Semantic Classification of Urban Trees Using High Resolution Satellite Imagery*. 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques, ICEECOT 2018, 10(4), 161-166.

- Martín-Vide, J., Artola, V.M., Cordobilla, M.J., Moreno, M.C., Montlleó, M. 2017. *Efectes del canvi climàtic a l'àrea metropolitana de Barcelona. L'illa de calor a l'àrea metropolitana de Barcelona. Quan l'amplada del carrer, l'alçada dels edificis i la impermeabilització del sòl afecten la temperatura a la ciutat*. Barcelona: Àrea Metropolitana de Barcelona.
- McManamon, P. 2015. *Field guide to Lidar*. Bellingham, Washington: SPIE Press.
- Moreno-García, M.C. 2019. The Microclimatic Effect of Green Infrastructure (GI) in a Mediterranean City: the Case of the Urban Park of Ciutadella (Barcelona, Spain). *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(3), 100-108.
- Niemeyer, J., Rottensteiner, F. y Soergel, U. 2014. Contextual classification of LiDAR data and building object detection in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87(0), 152-16.
- Nowak, D.J., Civerolo, K.L., Rao, S.T., Sistla, S., Luley, C.J., Crane, D.E. 2000. A modelling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment*, 34, 1601-1613.
- Ochoa, J.M. (2009). *Ciudad, vegetación e impacto climático*. Vilafranca del Penedés: Erasmus Ediciones.
- Oke, T.R. 1980. Climatic impacts of urbanization, En W. Bach, J. Pankrath y J. Williams (eds.), *Interaction of energy and climate, Proc. Internat. Workshop*, Münster, Alemania.
- Priego González de Canales, C. 2011. *Naturaleza y sociedad. El valor de los espacios verdes urbanos*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Publicaciones.
- Rebele, F. 1994. Urban ecology and special features of urban ecosystems. *Global Ecol. Biogeography Lett.*, 4(6), 173-187.
- Ribas Piera, M. (1973). Presentación y síntesis del Plan general de ordenación urbanística de Palma de Mallorca, redactado en 1970. Cuadernos de Arquitectura, 98, 47-53.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W. y Sehell, J.A. 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4*, Texas: Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- Spiller, M. 1993. *Roof gardens and green facades for the improvement of urban environments*. Thesis B.L. Arch, University of NSW.
- Yan, W.Y., Shaker, A. y El-Ashmawy, N. 2015. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158(0), 295-310.
- United Nations. 2018. *World urbanization prospects: the 2018 revision-key facts*. New York: United Nations.
- Zaforteza y Musoles, D. 1954. *La ciudad de Mallorca. Ensayo historico-toponímico*. Tomo II. Palma: Ajuntament de Palma.